



⑬ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 199 59 862 A 1**

⑤① Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**H 01 S 3/23**  
H 01 S 3/10  
B 23 K 26/00

②① Aktenzeichen: 199 59 862.2  
②② Anmeldetag: 10. 12. 1999  
④③ Offenlegungstag: 13. 6. 2001

DE 199 59 862 A 1

⑦① Anmelder:  
Forschungszentrum Jülich GmbH, 52428 Jülich, DE  
  
⑦④ Vertreter:  
Bungartz Hublé, 50933 Köln

⑦② Erfinder:  
Waser, Rainer, Prof. Dr., 52076 Aachen, DE; Baldus,  
Oliver, 52074 Aachen, DE; Krasser, Wolfgang, Dr.,  
52428 Jülich, DE

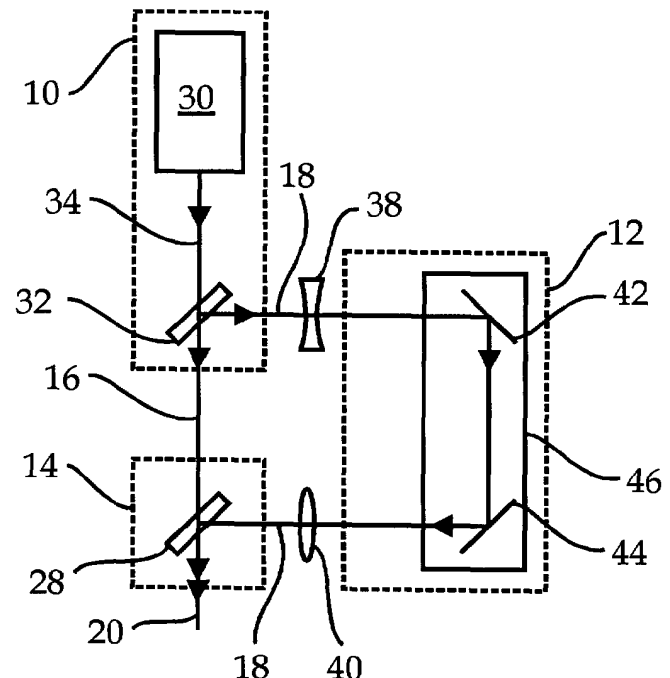
**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

⑤④ Lasersystem mit steuerbarer Pulsdauer

⑤⑦ Die Erfindung betrifft ein Lasersystem mit steuerbarer Pulsdauer, mit:

- einer Erzeugungseinrichtung (10), die wenigstens einen Puls laser (22) aufweist und derart ausgebildet ist, dass sie einen ersten Laserstrahl (16) und einen von diesem räumlich getrennten zweiten Laserstrahl (18) erzeugt;
- einer Verschiebungseinrichtung (12), die derart ausgebildet ist, dass sie den zweiten Laserstrahl (18) zeitlich gegenüber dem ersten Laserstrahl (16) verschiebt; und
- einer Zusammenführungseinrichtung (14), die derart ausgebildet ist, dass sie die beiden räumlich getrennten Laserstrahlen (16, 18) in einem Ausgangsstrahl (20) zusammenführt.

Dieses Lasersystem ist besonders zur Verwendung in einem Verfahren zur Herstellung einer kristallisierten keramischen Schicht durch Laser-Annealing geeignet, wobei das Temperaturprofil in der keramischen Schicht durch Steuerung der Pulsdauer des Ausgangsstrahls dieses Lasersystems eingestellt wird.



DE 199 59 862 A 1

Die Erfindung betrifft ein Lasersystem mit steuerbarer Pulsdauer.

Ein derartiges Lasersystem ist in Gestalt eines Lasers mit Güteschaltung (auch als "Q-Switch-Laser" bezeichnet) bekannt. Durch die Güteschaltung wird die Emissionsdauer des Lasers verkürzt, um die Spitzenleistung bei gegebener Pumpenergie zu erhöhen. Bei normalen Pulsbetrieb wird zum Beispiel bei Nd-YAG-Festkörperlasern ein Pumpimpuls von etwa 100  $\mu$ s Dauer eingestrahlt. Bei genügender Pumpleistung schwingt der Laser nach einigen  $\mu$ s an, und es entsteht während der gesamten restlichen Pumpdauer Laserstrahlung. Zur Erhöhung der Leistung des Laserimpulses kann man den Laser erst dann anschwingen lassen, wenn während des Pumpprozesses die maximale Besetzungsinversion erreicht ist. Dies ist am Ende des Pumpimpulses der Fall, falls die Lebensdauer des oberen Niveaus größer als die Pumpdauer ist. Durch die Güteschaltung wird der Resonator erst während des Pumpens zugeschaltet, das heißt, dass zunächst der Strahlengang zwischen den Spiegeln unterbrochen wird oder die internen Verluste erhöht werden und dass erst am Ende des Pumpimpulses der Resonator freigegeben wird. Aufgrund der dann bestehenden hohen Inversion entsteht ein kurzer Laserimpuls mit hoher Spitzenleistung.

Mit der Güteschaltung wird also im Vergleich zum normalen Pulsbetrieb die Pulsdauer des Lasers verkürzt. Es können dabei Pulsdauern von wenigen ns und Spitzenleistungen im GW-Bereich erreicht werden.

Es ist außerdem bekannt, ein Lasersystem mit steuerbarer Pulsdauer aus einem cw-Laser und einem Modulator aufzubauen, der den kontinuierlichen Laserstrahl des cw-Lasers periodisch unterbricht. Als Modulator werden beispielsweise mechanische Modulatoren, wie rotierende Schlitzscheiben (auch als "Chopper" bezeichnet), und elektrooptische Modulatoren wie Pockels-Zellen oder Kerr-Zellen verwendet. Mit einem derartigen Lasersystem können Impulse erzeugt werden, deren Pulsdauer deutlich größer als diejenige der bekannten Puls laser ist. Auf der anderen Seite ist jedoch die Spitzenleistung der Impulse durch die kontinuierliche Leistung des cw-Lasers begrenzt, wohingegen die bekannten Puls laser deutlich höhere Spitzenleistungen liefern können.

Es gibt nun Anwendungsfälle, in denen zum einen eine hohe Spitzenleistung, wie sie nur von Puls lasern geliefert werden kann, benötigt wird, so dass Lasersysteme aus cw-Laser und Modulator nicht in Frage kommen, und in denen zum anderen auch Pulsdauern gewünscht werden, die größer als diejenigen der Puls laser sind, so dass auch das oben erwähnte bekannte Lasersystem in Gestalt des Q-Switch-Lasers nicht in Frage kommt, da dessen Pulsdauer nach oben durch die Pulsdauer des im normalen Pulsbetrieb, das heißt ohne Güteschaltung betriebenen Puls lasers begrenzt ist.

Derartige Anwendungsfälle liegen beispielsweise auf dem Gebiet der Materialbearbeitung. So wird bei der Erzeugung von Dünnschichten aus elektrokeramischem Material bevorzugt sichtbares oder ultraviolettes Licht mit hoher Leistung eingesetzt. Elektrokeramische Materialien eröffnen eine Fülle von Funktionen, die traditionelle Halbleitermaterialien wie Si oder GaAs nicht bieten können. Bei diesen Funktionen handelt es sich um ferroelektrische Polarisation, hohe Kapazitätsdichten, magnetoresistive Eigenschaften, piezoelektrische Aktor- und Sensorfunktionen, Ionenleitung, Supraleitung, elektrooptische Aktivität, usw. Die Integration elektrokeramischer Materialien auf konventionellen integrierten Halbleiterschaltungen ist wünschenswert, da auf diesem Wege eine Kombination der elektrokeramischen

Funktionen mit denen der Mikroelektronik und Mikromechanik erzielt werden kann. Als Beispiel hierfür sind nichtflüchtige, ferroelektrische Speicher (sogenannte Fe-RAM) vorstellbar, die auf der Integration ferroelektrischer Keramiken auf Si-CMOS-Schaltungen beruhen.

Die Erzeugung qualitativ hochwertiger, dichter Keramikschichten erfordert in der Regel Temperaturen oberhalb von 500°C. Dies schränkt die Einsatzmöglichkeiten erheblich ein, da zum einen Bauelemente, wie zum Beispiel Transistoren, und Schichten, die unter der Keramikschicht liegen, nur mit großem Aufwand vor einer Oxidation durch die erhöhte Sauerstoff-Diffusionsrate geschützt werden können, und da zum anderen diese tiefer liegenden Schichten und Bauelemente durch eine Diffusion von Fremdelementen aus der Keramikschicht degradiert werden können. Außerdem kann die übliche Aluminium-Metallisierung erst nach der Keramikschicht aufgebracht werden, da diese Metallisierung nur bis zu einer Temperatur von etwa 400°C stabil bleibt.

Aufgrund dieser Einschränkungen ist es bisher nicht möglich, bereits fertige integrierte Schaltungen im Nachhinein um elektrokeramische Schichten mit den damit verbundenen neuen Funktionen zu ergänzen.

Die Laser-Annealing-Technik stellt einen Weg dar, die Temperaturbelastung des unter der Keramikschicht liegenden Substrats, das im obigen Beispiel die integrierte Halbleiterschaltung ist, gering zu halten und auf einen kurzen Zeitraum zu beschränken. Gemäß dieser Technik wird ein beispielsweise punkt- oder strichförmig fokussierter Laserstrahl von ausreichender Leistung mit kontrollierter Vorschubgeschwindigkeit über die "grüne" Keramikschicht bewegt (was auch als "Scanning" bezeichnet wird), um eine Kristallisation und Verdichtung der Keramikschicht zu erreichen.

Eine wichtige Randbedingung ergibt sich dabei aus dem Absorptionsspektrum der keramischen Dünnschichten, denn eine notwendige Voraussetzung für die Laser-Annealing-Technik ist die Absorption der Laserstrahlung in der elektrokeramischen Dünnschicht. Zahlreiche elektrokeramische Materialien, wie zum Beispiel Erdalkalitanate, absorbieren lediglich im fernen infraroten (FIR) und im ultravioletten (UV) Bereich, während sie im sichtbaren und nahen und mittleren infraroten (NIR bzw. MIR) Bereich vollständig transparent sind und daher mit Licht aus diesen Wellenlängenbereichen nicht erwärmt werden können. Folglich müssen FIR- oder UV-Laser eingesetzt werden. FIR-Laser mit ausreichender Leistung stehen derzeit nicht zur Verfügung, und die Laserstrahlung der sehr leistungsstarken CO<sub>2</sub>-Laser liegt im MIR- und NIR-Bereich und weist eine zu große Eindringtiefe auf. Daher wird bevorzugt die UV-Strahlung von Excimer-Lasern verwendet, deren Impulse eine ausreichende Leistung liefern.

Die bisher kommerziell verfügbaren Excimer-Laser weisen jedoch extrem kurze Pulsdauern von maximal 60 ns und zudem niedrige Pulsfrequenzen von maximal 100 Hz auf, so dass der bestrahlte Oberflächenbereich der Keramikschicht nach einem Impuls nahezu vollständig abkühlt, bevor der nächste Impuls folgt. Dadurch ist eine kontinuierliche, durch die Vorschub- bzw. Scanning-Geschwindigkeit steuerbare Eindringtiefe des Temperaturfeldes in die Keramikschicht hinein nicht erreichbar. So sind für größere Waver von beispielsweise 6 Zoll Pulsfrequenzen deutlich oberhalb von 1 kHz erforderlich.

Ähnliche Leistungen wie die Excimer-Laser bieten zwar auch frequenzverdoppelte Cu-Dampf-Laser und frequenzverdreifachte Nd:YAG-Laser, beide Lasertypen sind derzeit aber mit Pulsdauern oberhalb von 40 ns kommerziell nicht verfügbar.

Es ist daher Aufgabe der Erfindung, ein Lasersystem mit

steuerbarer Pulsdauer zur Verfügung zu stellen, das einen gepulsten Laserstrahl mit einer Pulsdauer erzeugen kann, die größer als die Pulsdauer des verwendeten Lasers ist.

Diese Aufgabe wird durch ein Lasersystem mit steuerbarer Pulsdauer gelöst, mit:

- einer Erzeugungseinrichtung, die wenigstens einen Puls laser aufweist und derart ausgebildet ist, dass sie einen ersten Laserstrahl und einen von diesem räumlich getrennten zweiten Laserstrahl erzeugt;
- einer Verschiebungseinrichtung, die derart ausgebildet ist, dass sie den zweiten Laserstrahl zeitlich gegenüber dem ersten Laserstrahl verschiebt; und
- einer Zusammenführungseinrichtung, die derart ausgebildet ist, dass sie die beiden räumlich getrennten Laserstrahlen in einem Ausgangsstrahl zusammenführt.

Das Lasersystem gemäß der Erfindung weist also wie schon das zu Beginn erwähnte bekannte Lasersystem, das aus einem Q-Switch-Laser besteht, einen Puls laser auf. Während jedoch bei dem bekannten Q-Switch-Laser die Steuerung der Pulsdauer mit Hilfe der Güteschaltung erfolgt, so dass die maximal erzielbare Pulsdauer durch die Pulsdauer (im folgenden auch als "Normalpulsdauer" bezeichnet) des Puls lasers bei normalen Pulsbetrieb, das heißt, ohne dass eine Güteschaltung angewendet wird, begrenzt ist, werden mit Hilfe der Zusammenführungseinrichtung die räumlich getrennten Laserstrahlen, die zeitlich gegeneinander verschoben sind, zu einem Ausgangsstrahl zusammengeführt, dessen Pulsdauer größer als die Normalpulsdauer des verwendeten Puls lasers ist.

Dieses Lasersystem ist folglich gut dafür geeignet, die im Zusammenhang mit dem beispielhaften Anwendungsfall der Erzeugung elektrokeramischer Dünnschichten diskutierte Forderung nach größeren Pulsdauern (wie zum Beispiel größer als 60 ns) bei unveränderter Normalpulsdauer, Pulsenergie und Wellenlänge des verwendeten Puls lasers zu erfüllen. Wenn beispielsweise als Puls laser der bisher schon für die Laser-Annealing-Technik verwendete Excimer-Laser mit einer Normalpulsdauer von 60 ns verwendet wird, dann kann das Lasersystem im einfachsten Falle zwei Laserstrahlen mit einer Pulsdauer von jeweils 60 ns erzeugen und den zweiten dieser beiden Laserstrahlen zeitlich um einen steuerbaren Betrag von beispielsweise 50 ns gegenüber dem ersten Laserstrahl verschieben, so dass nach dem Zusammenführen dieser beiden Laserstrahlen der von dem Lasersystem abgegebene Ausgangsstrahl eine Pulsdauer von ungefähr 110 ns (= 60 ns + 50 ns) aufweist.

Außerdem wird ein Verfahren zur Herstellung einer kristallisierten keramischen Schicht durch Laser-Annealing ermöglicht, das dadurch gekennzeichnet ist, dass das Temperaturprofil in der keramischen Schicht durch Steuerung der Pulsdauer des Ausgangsstrahls dieses Lasersystems eingestellt wird.

Die Steuerung der Pulsdauer des Ausgangsstrahls erfolgt bei diesem Verfahren mit Hilfe der Verschiebungseinrichtung, indem die zeitliche Verschiebung zwischen den Laserstrahlen geändert wird: eine Vergrößerung der zeitlichen Verschiebung führt zu einer Vergrößerung der Pulsdauer des Ausgangsstrahls.

Die Steuerung der Pulsdauer ist mit einer Genauigkeit von einigen Nanosekunden oder weniger möglich und wird gemäß der Erfindung zur Regelung des Temperaturprofils eingesetzt. Sie ermöglicht qualitativ höherwertige und gleichmäßigere Ergebnisse, da Abweichungen von dem gewünschten Temperaturprofil genau und schnell korrigiert werden können.

Die Vergrößerung der Pulsdauer führt bei gleichbleiben-

der Pulsenergie und Wellenlänge zu einem flacheren Temperaturgradienten in der Keramikschi cht und ermöglicht eine homogenere und sozusagen schonendere Behandlung der Keramikschi cht, eine höhere Vorschubgeschwindigkeit, eine niedrigere Flächenleistungsdichte und eine größere Kristallisationstiefe.

Bevorzugt ist bei diesem Verfahren vorgesehen, dass die Pulsdauer in Abhängigkeit von der Temperatur des bestrahlten Bereichs der Schicht geregelt wird. Die Temperaturüberwachung kann dabei durch Messung der Reflexion des bestrahlten Bereichs der Schicht erfolgen.

Weitere Merkmale und Ausbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen beschrieben.

Gemäß einer ersten Variante des Lasersystems ist vorgesehen, dass:

- die Erzeugungseinrichtung einen zweiten Puls laser aufweist, wobei der erste Laser den ersten Laserstrahl und der zweite Laser den zweiten Laserstrahl aussendet; und
- die Verschiebungseinrichtung eine Zeitschaltuhr aufweist, die derart ausgebildet ist, dass zuerst der erste Laser und dann mit einer einstellbaren Verzögerungszeit der zweite Laser gezündet wird.

Ein Vorteil dieser ersten Variante liegt darin, dass sich der zweite Puls laser hinsichtlich der Wellenlänge des von ihm ausgesendeten zweiten Laserstrahls von dem ersten Puls laser unterscheiden kann. Dies kann beispielsweise durch Verwendung eines anderen Lasermaterials oder bei baugleichen Lasern durch eine andere Abstimmung erreicht werden. Der dann von dem Lasersystem abgegebene Ausgangsstrahl weist folglich zwei Wellenlängenanteile auf, was beispielsweise bei den komplexen Vorgängen, die bei der Laser-Annealing-Technik von elektrokeramischen Dünnschichten auftreten, gewünscht sein kann. Außerdem wird durch den zweiten Laser auch die Energie des Ausgangsstrahls im Vergleich zu einem Lasersystem, das mit nur einem Puls laser arbeitet, erhöht.

Gemäß einer zweiten Variante des Lasersystems ist vorgesehen, dass:

- die Erzeugungseinrichtung einen Strahlteiler aufweist, der den von dem Laser ausgesendeten Laserstrahl in den ersten und den zweiten Laserstrahl aufteilt; und
- die Verschiebungseinrichtung eine einstellbare optische Verzögerungsstrecke für den zweiten Laserstrahl aufweist.

Bei dieser zweiten Variante liegt ein Vorteil darin, dass im Unterschied zu der ersten Variante lediglich ein Laser erforderlich ist, um die beiden Laserstrahlen zu erzeugen.

Diese zweite Variante kann auch mit der ersten Variante kombiniert werden, um beispielsweise vier Laserstrahlen zu erzeugen, die zeitlich gegeneinander verschoben sind und einen Ausgangsstrahl mit einer noch größeren Pulsdauer ermöglichen. Hierzu kann zu den beiden Lasern der ersten Variante jeweils eine Erzeugungseinrichtung und eine Verschiebungseinrichtung gemäß der zweiten Variante vorgesehen sein.

Im Falle der zweiten Variante kann vorgesehen sein, dass die optische Verzögerungsstrecke durch eine Spiegelanordnung gebildet wird, die einen Eingangsspiegel und einen Ausgangsspiegel aufweist, die derart angeordnet sind, dass der zweite Laserstrahl von dem Strahlteiler auf den Eingangsspiegel trifft und zu dem Ausgangsspiegel umgelenkt wird, der ihn zu der Zusammenführungseinrichtung um-

lenkt.

Da der zweite Laserstrahl den Umweg von dem Strahlteiler über den Eingangsspiegel und den Ausgangsspiegel bis zu der Zusammenführungseinrichtung zurücklegen muss, kommt er dort zu einem späteren Zeitpunkt an als der erste Laserstrahl, der nur den direkten Weg von dem Strahlteiler zu der Zusammenführungseinrichtung zurücklegen musste. Der zweite Laserstrahl ist somit zeitlich gegenüber dem ersten Laserstrahl verschoben. Wenn die Lichtgeschwindigkeit mit  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s angenommen wird, führt folglich ein Umweg von 1 m zu einer Zeitverschiebung von 3,3 ns ( $= 1 \text{ m} : 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ).

Dann kann weiter vorgesehen sein, dass die Spiegelanordnung wenigstens zwei Zwischenspiegel aufweist, die derart angeordnet sind, dass der zweite Laserstrahl von dem Eingangsspiegel über die Zwischenspiegel zu dem Ausgangsspiegel umgelenkt wird.

Mit den Zwischenspiegeln kann die Länge des Umweges, den der zweite Laserstrahl zurücklegen muss, deutlich vergrößert werden, ohne dass auch der Platzbedarf der Spiegelanordnung entsprechend ansteigt.

Vorteilhafterweise ist dann vorgesehen, dass die Zwischenspiegel in zwei parallelen Reihen jeweils äquidistant derart angeordnet sind, dass der zweite Laserstrahl von dem Eingangsspiegel auf den ersten Zwischenspiegel in der ersten Reihe trifft und zu dem ersten Zwischenspiegel in der zweiten Reihe umgelenkt wird und nacheinander zwischen den Zwischenspiegeln der beiden Reihen hin- und herläuft, bis er von dem letzten Zwischenspiegel der ersten Reihe auf den letzten Zwischenspiegel der zweiten Reihe trifft und zu dem Ausgangsspiegel umgelenkt wird.

Mit dieser Anordnung der Zwischenspiegel wird ein besonders kompakter und regelmäßiger Aufbau der Spiegelanordnung ermöglicht.

Vorzugsweise ist vorgesehen, dass die Zusammenführungseinrichtung einen teildurchlässigen Spiegel aufweist.

Im folgenden werden bevorzugte Ausführungsbeispiele anhand der beigefügten Zeichnungen näher beschrieben.

**Fig. 1** zeigt in einer Draufsicht schematisch den Aufbau eines Lasersystems mit steuerbarer Pulsdauer in einer ersten Ausführungsform;

**Fig. 2** zeigt in einer Draufsicht schematisch den Aufbau eines Lasersystems mit steuerbarer Pulsdauer in einer zweiten Ausführungsform, die eine optische Verzögerungsstrecke in einer ersten Ausführungsform aufweist;

**Fig. 3** zeigt in einer Draufsicht schematisch den Aufbau einer optischen Verzögerungsstrecke in einer zweiten Ausführungsform, bei der maximale Umweg eingestellt ist; und

**Fig. 4** zeigt die optische Verzögerungsstrecke der **Fig. 3**, bei der jedoch ein um einen Schritt verkürzter Umweg eingestellt ist.

In den **Fig. 1** und **2** ist ein Lasersystem mit steuerbarer Pulsdauer in zwei Ausführungsformen dargestellt, die sich grundlegend voneinander unterscheiden, wie im folgenden näher erläutert werden wird. Gemäß den **Fig. 1** und **2** weist das Lasersystem eine Erzeugungseinrichtung **10**, eine Verschiebungseinrichtung **12** und eine Zusammenführungseinrichtung **14** auf. Die Erzeugungseinrichtung **10** dient dazu, einen ersten gepulsten Laserstrahl **16** und einen von diesem räumlich getrennten zweiten gepulsten Laserstrahl **18** zu erzeugen. Die Verschiebungseinrichtung **12** dient dazu, den zweiten Laserstrahl **18** zeitlich gegenüber dem ersten Laserstrahl **16** zu verschieben. Die Zusammenführungseinrichtung **14** dient dazu, die beiden räumlich getrennten Laserstrahlen **16**, **18** zusammenzuführen, so dass sie einen Ausgangsstrahl **20** mit der gewünschten Pulsdauer abgibt.

Gemäß der **Fig. 1** weist bei der ersten Ausführungsform des Lasersystems die Erzeugungseinrichtung **10** einen er-

sten Puls laser **22**, der den ersten Laserstrahl **16** aussendet, und einen zweiten Puls laser **24** auf, der den zweiten Laserstrahl **18** aussendet. Außerdem weist bei dieser ersten Ausführungsform die Verschiebungseinrichtung eine Zeitschaltuhr **26** auf, die derart ausgebildet ist, dass zuerst der erste Laser **22** und dann mit einer einstellbaren Verzögerungszeit der zweite Laser **24** gezündet wird. Die Zusammenführungseinrichtung **14** umfasst hier einen teildurchlässigen Spiegel **28**, der bevorzugt dichroitisch ist.

Wie in der **Fig. 1** gut zu erkennen ist, laufen die beiden Laserstrahlen **16**, **18** in der Horizontalebene (die der Zeichenebene entspricht) rechtwinklig zueinander. Im Schnittpunkt beider Laserstrahlen **16**, **18** ist der teildurchlässige Spiegel **28** derart angeordnet, dass seine unverspiegelte Seite unter einem Winkel von  $45^\circ$  zu dem ersten Laserstrahl **16** und seine reflektierende Seite unter einem Winkel von ebenfalls  $45^\circ$  zu dem zweiten Laserstrahl **18** steht. Außerdem sind die beiden Laser **22**, **24** derart angeordnet, dass der erste Laserstrahl **16** dieselbe Wegstrecke bis zu dem teildurchlässigen Spiegel **28** zurücklegen muss wie der zweite Laserstrahl. Folglich treffen die einzelnen Impulse des zweiten Laserstrahls **18** um die durch die Zeitschaltuhr **26** vorgegebene Verzögerungszeit später bei dem teildurchlässigen Spiegel **28** ein als diejenigen des ersten Laserstrahls **16**. Da der erste Laserstrahl **16** den teildurchlässigen Spiegel **28** nahezu ohne Richtungsänderung durchdringt, der zweite Laserstrahl **18** hingegen an dem teildurchlässigen Spiegel **28** um  $90^\circ$ , das heißt in der **Fig. 1** von rechts nach unten, umgelenkt wird, sind die beiden Laserstrahlen **16**, **18**, die vor dem teildurchlässigen Spiegel **28** räumlich getrennt sind, hinter dem teildurchlässigen Spiegel **28** nun zusammengeführt und bilden durch Überlagerung den Ausgangsstrahl **20**. Da die Taktfrequenz, mit der die beiden Laser **22**, **24** gezündet werden, gleich ist, und die Impulse des zweiten Laserstrahls **18** zeitlich gegenüber denen des ersten Laserstrahls **16** verschoben sind, entspricht die Pulsfrequenz des Ausgangsstrahls **20**, wie auch die der beiden Laserstrahlen **16**, **18**, der Taktfrequenz der beiden Laser **22**, **24**, wohingegen seine Pulsdauer entsprechend der Überlagerung der beiden Laserstrahlen **16**, **18** größer als deren Pulsdauern ist. Die Pulsdauer des Ausgangsstrahls **20** kann demnach durch Verstellen der Verzögerungszeit mit Hilfe der Zeitschaltuhr **26** nach Wunsch gesteuert werden.

Eine Einstellung der Verzögerungszeit ist mit einer Genauigkeit im Nanosekundenbereich leicht auf mikroelektronischem Wege erreichbar, so dass auch die Pulsdauer des Ausgangsstrahls **20** mit dieser Genauigkeit eingestellt werden kann. Der Ausgangsstrahl **20** mit der gewünschten Pulsdauer kann dann beispielsweise im Falle der Laser-Annealing-Technik wie gewohnt über die elektrokeramische Dünnschicht geführt werden.

Die verwendeten Laser **22**, **24** können bei derselben Wellenlänge arbeiten, es ist jedoch auch möglich, verschiedene Wellenlängen zu wählen, die dann auch in dem Ausgangsstrahl **20** enthalten sind.

Außerdem können nach Bedarf auch mehr als die beiden Puls laser **22**, **24** vorgesehen sein, um beispielsweise noch eine weitere Wellenlänge in dem Ausgangsstrahl **20** zur Verfügung zu haben und/oder die Pulsdauer des Ausgangsstrahls **20** noch größer machen zu können. Ein (nicht dargestellter) dritter Laser könnte beispielsweise in der **Fig. 1** unterhalb des zweiten Lasers **24** vorgesehen sein, der einen dritten Laserstrahl parallel zu dem zweiten Laserstrahl **18** erzeugt und ebenfalls mit der Zeitschaltuhr **26** verbunden ist. Diese Zeitschaltuhr **26** ist dann so ausgebildet, dass der dritte Laser mit einer eigenen einstellbaren Verzögerungszeit nach dem zweiten Laser **24** gezündet wird. An dem Schnittpunkt zwischen dem dritten Laserstrahl und dem

Ausgangsstrahl **20** kann dann ein (nicht dargestellter) zweiter teildurchlässiger Spiegel vorgesehen sein, der wie der dargestellte teildurchlässige Spiegel **28** den Ausgangsstrahl **20** und den dritten Laserstrahl zusammenführt.

Gemäß der **Fig. 2** weist bei der zweiten Ausführungsform des Lasersystems die Erzeugungseinrichtung **10** einen einzigen Puls laser **30** und einen Strahlteiler **32** auf, der den von dem Laser **30** ausgesendeten Laserstrahl **34** in den ersten Laserstrahl **16** und den zweiten Laserstrahl **18** aufteilt. Außerdem weist bei dieser zweiten Ausführungsform die Verschiebungseinrichtung **12** eine einstellbare optische Verzögerungsstrecke **36** für den zweiten Laserstrahl **18** auf. Die Zusammenführungseinrichtung **14** ist hier wie bei der ersten Ausführungsform der **Fig. 1** ein teildurchlässiger Spiegel **28**, der den ersten Laserstrahl **16** und den zweiten Laserstrahl **18**, nachdem dieser die optische Verzögerungsstrecke **36** durchlaufen hat, zu dem Ausgangsstrahl **20** zusammenführt.

Bei dieser zweiten Ausführungsform des Lasersystems wird also der zweite Laserstrahl **18** dadurch zeitlich gegenüber dem ersten Laserstrahl **16** verschoben, dass er über den Umweg durch die optische Verzögerungsstrecke **36** zu dem teildurchlässigen Spiegel **28** geführt wird. So führt beispielsweise ein Umweg von 1 m zu einer zeitlichen Verschiebung von 3,3 ns ( $= 1 \text{ m} : 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ).

Da der zweite Laserstrahl **18** ab dem Strahlteiler **32** einen deutlich längeren Weg bis zu dem teildurchlässigen Spiegel **28** als der erste Laserstrahl **16** zurücklegen muss, ist gemäß der **Fig. 2** zwischen der Erzeugungseinrichtung **10** und der optischen Verzögerungsstrecke **36** ein Fernrohr **38** (schematisch durch eine Konkavlinse dargestellt) zur Aufweitung des zweiten Laserstrahls **18** vorgesehen. Damit wird eine Verringerung der Strahldispersion erreicht. Diese Aufweitung wird mit Hilfe einer Fokussierungsoptik **40** (schematisch durch eine Konvexlinse dargestellt) rückgängig gemacht, die zwischen dem Ausgang der optischen Verzögerungsstrecke **36** und dem teildurchlässigen Spiegel **28** vorgesehen ist.

Das Lasersystem der **Fig. 2** weist eine optische Verzögerungsstrecke **36** in einer ersten Ausführungsform auf. Bei dieser ersten Ausführungsform wird die Verzögerungsstrecke **36** durch eine Spiegelanordnung gebildet, die einen Eingangsspiegel **42** und einen Ausgangsspiegel **44** aufweist. Diese beiden Spiegel **42, 44** sind auf einem gemeinsamen Schlitten **46** angebracht, der zur Einstellung des Umweges rechtwinklig zu dem ersten Laserstrahl **16**, das heißt in der **Fig. 2** nach links und rechts, verschoben werden kann.

Der Eingangsspiegel **42** und der Ausgangsspiegel **44** sind so auf dem Schlitten **46** angeordnet, dass der zweite Laserstrahl **18** von dem Strahlteiler **32** auf den Eingangsspiegel **42** trifft, der ihn zu dem Ausgangsspiegel **44** umlenkt, der ihn wiederum zu dem teildurchlässigen Spiegel **28** umlenkt. Dies wird beispielsweise gemäß der **Fig. 2** dadurch erreicht, dass der Eingangsspiegel **42** unter einem Winkel von  $45^\circ$  nach unten zu dem von links einfallenden zweiten Laserstrahl **18** weist und diesen folglich rechtwinklig nach unten zu dem Ausgangsspiegel **44** reflektiert, der unter einem Winkel von ebenfalls  $45^\circ$  nach links zu dem von oben einfallenden zweiten Laserstrahl **18** weist und diesen folglich rechtwinklig nach links zu dem teildurchlässigen Spiegel **28** reflektiert.

Der Abstand zwischen dem Eingangsspiegel **42** und dem Ausgangsspiegel **44** ist hier gleich dem Abstand zwischen dem Strahlteiler **32** und dem teildurchlässigen Spiegel **28** gewählt, so dass der zweite Laserstrahl **18** zwischen dem Eingangsspiegel **42** und dem Ausgangsspiegel **44** dieselbe Entfernung zurücklegen muss wie der erste Laserstrahl **16** zwischen dem Strahlteiler **32** und dem teildurchlässigen

Spiegel **28**. Demnach wird der Umweg des zweiten Laserstrahls **18** relativ zu dem ersten Laserstrahl **16** durch den Abstand zwischen dem Eingangsspiegel **42** und dem Strahlteiler **32** und den Abstand zwischen dem Ausgangsspiegel **44** und dem teildurchlässigen Spiegel **28** bestimmt, die hier gleich groß sind. Wenn nun in der **Fig. 2** der Schlitten **46** um 0,5 m nach rechts verschoben wird, dann vergrößert sich der Umweg um 1 m ( $= 2 \cdot 0,5 \text{ m}$ ), was einer zeitlichen Verschiebung des zweiten Laserstrahls **18** gegenüber dem ersten Laserstrahl **16** von 3,3 ns entspricht.

Die **Fig. 3** zeigt eine zweite Ausführungsform der optischen Verzögerungsstrecke **36**. Bei dieser zweiten Ausführungsform sind zusätzlich zu dem Eingangsspiegel **42** und dem Ausgangsspiegel **44** wenigstens zwei Zwischenspiegel **48, 50** vorgesehen, die derart angeordnet sind, dass der zweite Laserstrahl **18** von dem Eingangsspiegel **42** über die Zwischenspiegel **48, 50** zu dem Ausgangsspiegel **44** umgelenkt wird.

Gemäß der **Fig. 2** wird dies beispielsweise mit insgesamt 6 Zwischenspiegeln verwirklicht, die in zwei parallelen Reihen jeweils äquidistant angeordnet sind. Zur besseren Unterscheidung werden im folgenden die Zwischenspiegel in der ersten Reihe von links nach rechts in der **Fig. 3** mit den Bezugszeichen **48.1, 48.2** und **48.3** und die Zwischenspiegel in der zweiten Reihe, die in der **Fig. 3** oberhalb der ersten Reihe verläuft, von links nach rechts mit den Bezugszeichen **50.1, 50.2** und **50.3** bezeichnet.

Sämtliche Spiegel **42, 44, 48, 50** der optischen Verzögerungsstrecke **36** sind auf einem gemeinsamen Schlitten **46** angebracht, der wie bei der ersten Ausführungsform der **Fig. 2** nach links und rechts in der **Fig. 3** zur kontinuierlichen Feineinstellung des Umweges verschoben werden kann.

Die Zwischenspiegel **48, 50** sind derart angeordnet, dass der zweite Laserstrahl **18** von dem Eingangsspiegel **42** auf den ersten Zwischenspiegel **48.1** in der ersten Reihe trifft, der ihn zu dem ersten Zwischenspiegel **50.1** der zweiten Reihe reflektiert. Dieser wiederum reflektiert ihn zu dem zweiten Zwischenspiegel **48.2** der ersten Reihe, der ihn seinerseits zu dem zweiten Zwischenspiegel **50.2** der zweiten Reihe reflektiert. Von dort läuft der zweite Laserstrahl **18** zum dritten Zwischenspiegel **48.3** der ersten Reihe, der ihn auf den dritten Zwischenspiegel **50.3** der zweiten Reihe reflektiert. Dieser schließlich lenkt ihn zu dem Ausgangsspiegel **44** um, der in der **Fig. 3** unterhalb der ersten Reihe angeordnet ist, so dass der zweite Laserstrahl **18** ungestört an den Zwischenspiegeln **48** der ersten Reihe vorbei zu dem teildurchlässigen Spiegel **28** laufen kann.

Der zweite Laserstrahl **18** läuft also in einer Zickzacklinie nacheinander zwischen den Zwischenspiegeln **48** der ersten Reihe und den Zwischenspiegeln **50** der zweiten Reihe hin und her. Dadurch wird bei geringem Platzbedarf der optischen Verzögerungsstrecke **36** ein langer Umweg ermöglicht. Da zudem die beiden Reihen parallel verlaufen und die Zwischenspiegel **48, 50** einer jeden Reihe äquidistant angeordnet sind, ergibt sich ein sehr regelmäßiger Verlauf der Zickzacklinie. So stimmen die Reflexionswinkel bei den einzelnen Zwischenspiegeln **48, 50** miteinander überein, und zum anderen sind die von dem zweiten Laserstrahl zurückzulegenden Entfernungen zwischen jeweils zwei aufeinanderfolgenden Zwischenspiegeln, also der Abstand zwischen dem ersten Zwischenspiegel **48.1** der ersten Reihe und dem ersten Zwischenspiegel **50.1** der zweiten Reihe, der Abstand zwischen diesem und dem zweiten Zwischenspiegel der ersten Reihe, und so weiter, ebenfalls gleich. Der Vorteil dieser gleichen Spiegelabstände liegt darin, dass der Umweg auf einfache Art und Weise in gleich großen Schritten verringert werden kann. Zu diesem Zweck ist jeder Zwischenspiegel **48** der ersten Reihe abnehmbar auf dem Schlit-

ten **46** angebracht. Dies kann beispielsweise mit Hilfe von (nicht dargestellten) Verankerungsstiften erfolgen, die an den Zwischenspiegeln **48** der ersten Reihe befestigt sind und in (nicht dargestellte) zugehörige Aufnahmeöffnungen in der Oberseite des Schlittens **46** passen.

Wenn nun beispielsweise gemäß der **Fig. 4** der dritte Zwischenspiegel **48.3** der ersten Reihe von dem Schlitten **46** abgenommen wird, dann ist zunächst der zickzackförmige Strahlengang des zweiten Laserstrahls **18** an dieser Stelle unterbrochen, so dass der zweite Laserstrahl **18** nicht mehr über den dritten Zwischenspiegel **50.3** der zweiten Reihe zu dem Ausgangsspiegel **44** umgelenkt wird. Als weitere Maßnahme wird der Ausgangsspiegel **44** gemäß der **Fig. 4** in eine Position auf dem Schlitten **46** gebracht, in der er den von dem zweiten Zwischenspiegel **50.2** der zweiten Reihe einfallenden zweiten Laserstrahl **18** wieder zu dem teildurchlässigen Spiegel **28** umlenkt. Zu diesem Zweck ist der Ausgangsspiegel **44** verschiebbar auf dem Schlitten **46** angebracht. Da jetzt der dritte Zwischenspiegel **48.3** der ersten Reihe und der dritte Zwischenspiegel **50.3** der zweiten Reihe nicht mehr im Strahlengang des zweiten Laserstrahls **18** liegen, ist dessen Umweg durch die optische Verzögerungsstrecke **36** um das Doppelte des Spiegelabstands verringert.

Auf die gleiche Art und Weise lässt sich der Umweg um das Vierfache des Spiegelabstands verringern, indem einfach nicht der dritte Zwischenspiegel **48.3** der ersten Reihe von dem Schlitten **46** abgenommen wird, sondern der zweite Zwischenspiegel **48.2** der ersten Reihe, und indem der Ausgangsspiegel **44** in der **Fig. 3** entsprechend weiter nach links verschoben wird. Das gleiche gilt entsprechend bei Abnehmen des ersten Zwischenspiegels **48.1** der ersten Reihe, wodurch der Umweg um das Sechsfache des Spiegelabstands verringert wird.

#### BEZUGSZEICHENLISTE

- 10** Erzeugungseinrichtung
- 12** Verschiebungseinrichtung
- 14** Zusammenführungseinrichtung
- 16** erster Laserstrahl
- 18** zweiter Laserstrahl
- 20** Ausgangsstrahl
- 22** erster Puls laser
- 24** zweiter Puls laser
- 26** Zeitschaltuhr
- 28** teildurchlässiger Spiegel
- 30** Puls laser
- 32** Strahlteiler
- 34** Laserstrahl
- 36** optische Verzögerungsstrecke
- 38** Fernrohr
- 40** Fokussierungsoptik
- 42** Eingangsspiegel
- 44** Ausgangsspiegel
- 46** Schlitten
- 48** Zwischenspiegel der ersten Reihe
- 50** Zwischenspiegel der zweiten Reihe

#### Patentansprüche

1. Lasersystem mit steuerbarer Pulsdauer, mit:
  - einer Erzeugungseinrichtung (**10**), die wenigstens einen Puls laser (**22, 30**) aufweist und derart ausgebildet ist, dass sie einen ersten Laserstrahl (**16**) und einen von diesem räumlich getrennten zweiten Laserstrahl (**18**) erzeugt;
  - einer Verschiebungseinrichtung (**12**), die derart

ausgebildet ist, dass sie den zweiten Laserstrahl (**18**) zeitlich gegenüber dem ersten Laserstrahl (**16**) verschiebt; und

- einer Zusammenführungseinrichtung (**14**), die derart ausgebildet ist, dass sie die beiden räumlich getrennten Laserstrahlen (**16, 18**) in einem Ausgangsstrahl (**20**) zusammenführt.

2. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass:

- die Erzeugungseinrichtung (**10**) einen zweiten Puls laser (**24**) aufweist, wobei der erste Laser (**22**) den ersten Laserstrahl (**16**) und der zweite Laser (**24**) den zweiten Laserstrahl (**18**) aussendet; und
- die Verschiebungseinrichtung (**12**) eine Zeitschaltuhr (**26**) aufweist, die derart ausgebildet ist, dass zuerst der erste Laser (**22**) und dann mit einer einstellbaren Verzögerungszeit der zweite Laser (**24**) gezündet wird.

3. Lasersystem nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass:

- die Erzeugungseinrichtung (**10**) einen Strahlteiler (**32**) aufweist, der den von dem Laser (**30**) ausgesendeten Laserstrahl (**34**) in den ersten und den zweiten Laserstrahl (**16, 18**) aufteilt; und
- die Verschiebungseinrichtung (**12**) eine einstellbare optische Verzögerungsstrecke (**36**) für den zweiten Laserstrahl (**18**) aufweist.

4. Lasersystem nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die optische Verzögerungsstrecke (**36**) durch eine Spiegelanordnung gebildet wird, die einen Eingangsspiegel (**42**) und einen Ausgangsspiegel (**44**) aufweist, die derart angeordnet sind, dass der zweite Laserstrahl (**18**) von dem Strahlteiler (**32**) auf den Eingangsspiegel (**42**) trifft und zu dem Ausgangsspiegel (**44**) umgelenkt wird, der ihn zu der Zusammenführungseinrichtung (**14**) umlenkt.

5. Lasersystem nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Spiegelanordnung wenigstens zwei Zwischenspiegel (**48, 50**) aufweist, die derart angeordnet sind, dass der zweite Laserstrahl (**18**) von dem Eingangsspiegel (**42**) über die Zwischenspiegel (**48, 50**) zu dem Ausgangsspiegel (**44**) umgelenkt wird.

6. Lasersystem nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Zwischenspiegel (**48, 50**) in zwei parallelen Reihen jeweils äquidistant derart angeordnet sind, dass der zweite Laserstrahl (**18**) von dem Eingangsspiegel (**42**) auf den ersten Zwischenspiegel (**48.1**) in der ersten Reihe trifft und zu dem ersten Zwischenspiegel (**50.1**) in der zweiten Reihe umgelenkt wird und nacheinander zwischen den Zwischenspiegeln (**48, 50**) der beiden Reihen hin- und herläuft, bis er von dem letzten Zwischenspiegel (**48.3**) der ersten Reihe auf den letzten Zwischenspiegel (**50.3**) der zweiten Reihe trifft und zu dem Ausgangsspiegel (**44**) umgelenkt wird.

7. Lasersystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Zusammenführungseinrichtung (**14**) einen teildurchlässigen Spiegel (**28**) aufweist.

8. Verwendung des Lasersystems nach einem der vorhergehenden Ansprüche in einem Verfahren zur Herstellung einer kristallisierten keramischen Schicht durch Laser-Annealing, bei dem das Temperaturprofil in der keramischen Schicht durch Steuerung der Pulsdauer des Ausgangsstrahls (**20**) eingestellt wird.

9. Verwendung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Pulsdauer in Abhängigkeit von der Temperatur des bestrahlten Oberflächenbereichs der

Schicht geregelt wird.

10. Verwendung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Temperaturüberwachung durch Messung der Reflexion von dem bestrahlten Oberflächenbereich der Schicht erfolgt.

5

---

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

---

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

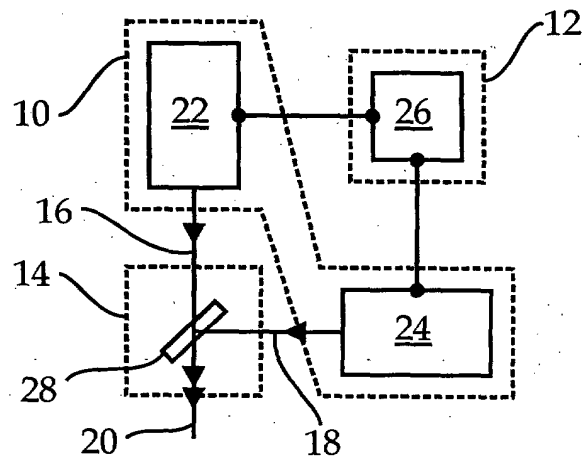
60

65

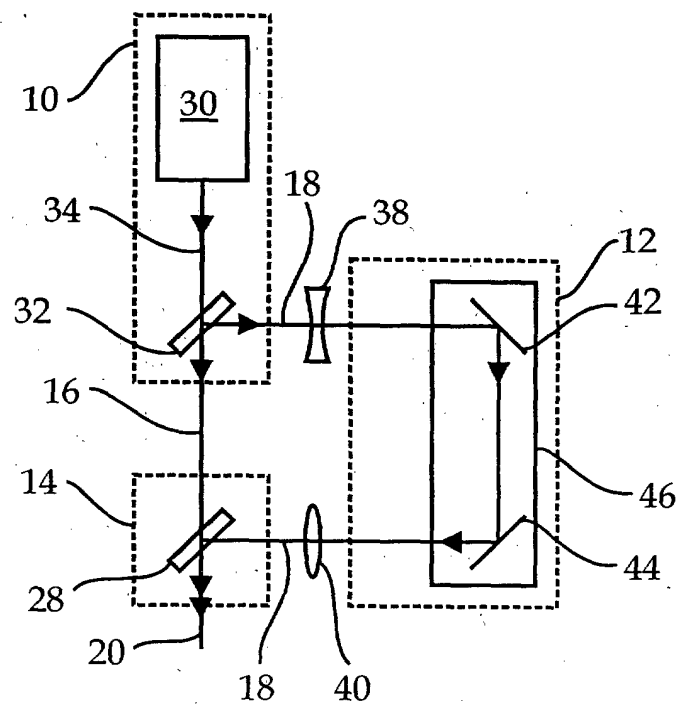
- Leerseite -



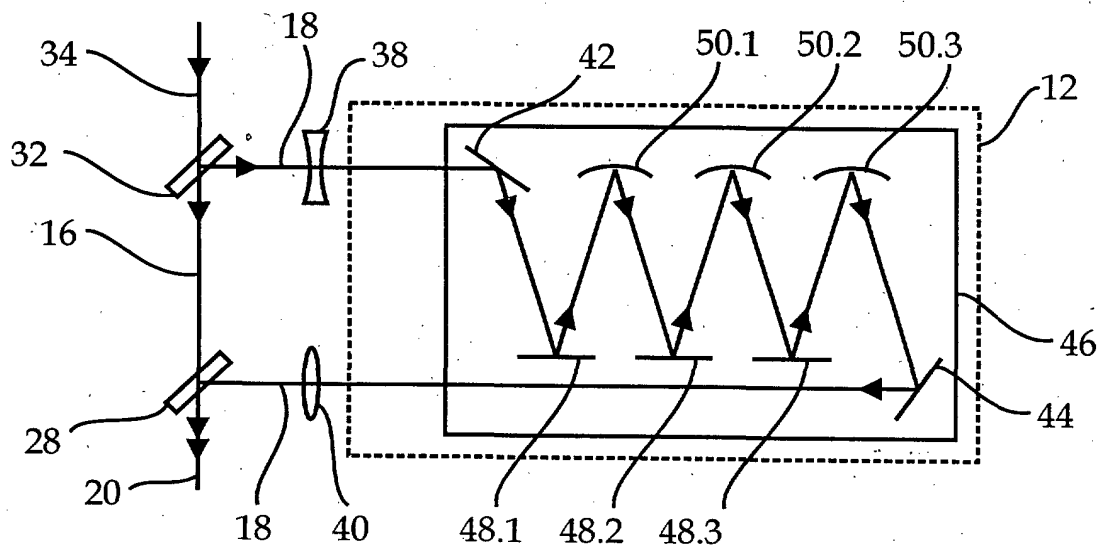
**FIG. 1**



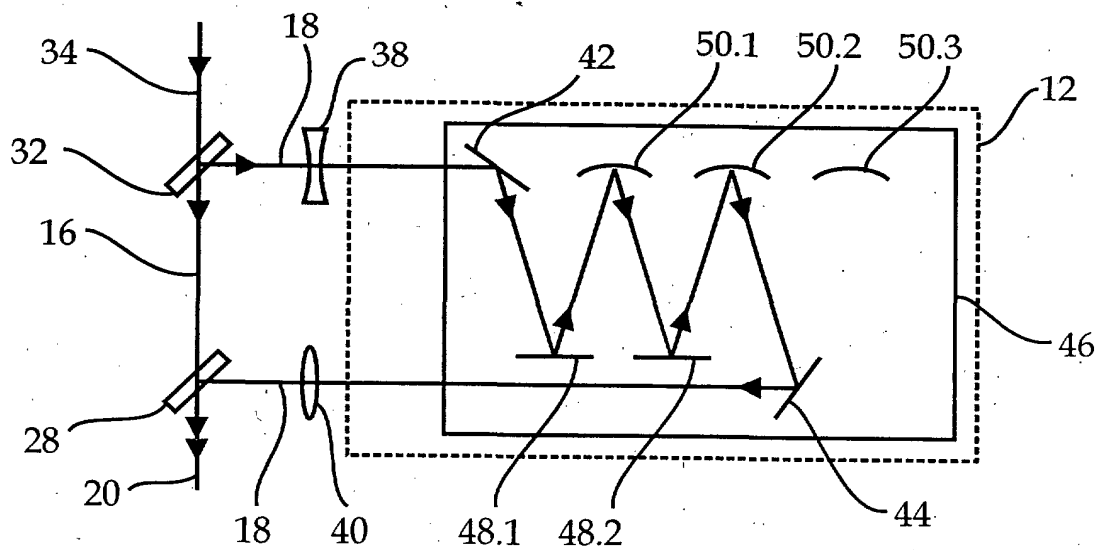
**FIG. 2**



**FIG. 3**



**FIG. 4**



**DERWENT-ACC-NO:** 2001-391173**DERWENT-WEEK:** 200142

COPYRIGHT 2009 DERWENT INFORMATION LTD

**TITLE:** Laser system with controlled pulse duration for e.g. ceramic layer crystallization, produces split beams of which one undergoes controlled phase-shift before recombination

**INVENTOR:** BALDUS O; KRASSER W ; WASER R**PATENT-ASSIGNEE:** FORSCHUNGSZENTRUM JUELICH GMBH[KERJ]**PRIORITY-DATA:** 1999DE-1059862 (December 10, 1999)**PATENT-FAMILY:**

PUB-NO	PUB-DATE	LANGUAGE
DE 19959862 A1	June 13, 2001	DE
WO 0143243 A2	June 14, 2001	DE

**DESIGNATED-STATES:** JP KR US AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LU MC  
NL PT SE TR

**APPLICATION-DATA:**

PUB-NO	APPL-DESCRIPTOR	APPL-NO	APPL-DATE
DE 19959862A1	N/A	1999DE-1059862	December 10, 1999
WO2001043243A2	N/A	2000WO-DE04314	December 4, 2000

**INT-CL-CURRENT:**

TYPE	IPC DATE
CIPS	B23K26/06 20060101
CIPS	C04B41/00 20060101
CIPS	C04B41/80 20060101

**ABSTRACTED-PUB-NO:** DE 19959862 A1**BASIC-ABSTRACT:**

NOVELTY - A beam generator (10) including at least one pulsed laser (30), produces spatially-separated beams (16,18). A phase shifter (12) operates on one of the beams. The combiner (14) produces a single output beam (20).

USE - To control pulse duration of a laser beam. To e.g. produce crystallized ceramic layers by laser annealing. To make electro-ceramic microcomponents and microcircuits.

ADVANTAGE - A greater pulse duration can be achieved than with earlier Q-switched lasers. The output is particularly suitable for laser annealing of ceramics. The method forms part of such a process, described in the companion disclosure DE19959861-A1 which provides further detail.

DESCRIPTION OF DRAWING(S) - A schematic diagram shows the optical paths of the laser beams.

beam generator (10)

phase shifter (12)

combiner (14)

spatially-separated beams (16,18)

single output beam (20)

pulsed laser (30)

**CHOSEN-DRAWING:** Dwg.2/4

**TITLE-TERMS:** LASER SYSTEM CONTROL PULSE DURATION CERAMIC LAYER PRODUCE  
SPLIT BEAM ONE PHASE SHIFT RECOMBINATION

**DERWENT-CLASS:** P55 V08 X24

**EPI-CODES:** V08-A07; X24-D03;

**SECONDARY-ACC-NO:**

**Non-CPI Secondary Accession Numbers:** 2001-287738